冰芯气候环境记录研究：从科学到政策

姚檀栋[1,2*]　秦大河[3]　王宁练[2,4,5]　刘勇勤[1,2]　徐柏青[1,2]

1 中国科学院青藏高原研究所 北京 100101
2 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心 北京 100101
3 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室 兰州 730000
4 西北大学 城市与环境学院 西安 710127
5 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室 西安 710127

摘要 冰芯是过去气候环境变化信息的重要载体。文章着重阐述了三极（南极、北极和第三极）冰芯研究在揭示过去气候变化、大气温室气体含量变化、太阳活动、火山活动及人类活动等方面所取得的成就，并说明冰芯研究对相关环境政策制定（如含铅汽油禁用政策、温室气体减排政策）的推动作用。建议国家尽快建立冰芯档案储藏库，以拯救冰芯资源，为后世科学研究与国家发展服务。

关键词 冰芯记录，三极环境，气候变化，环境政策，人类活动，全球变暖

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20200303001

冰芯是从冰川上钻取的圆柱状雪冰样品。取自冰川积累区的冰芯，包含着过去逐年积累的降雪和干、湿沉降物质，这些物质保存着其沉积时的气候环境信息。在 20 世纪 50—60 年代，丹麦 Dansgaard[1]通过对降水稳定同位素的研究，发现极地地区降水中氧、氢同位素比率（$\delta^{18}O$ 和 δD）变化与温度之间存在密切关系；进而，他提出分析冰芯中氧、氢同位素比率变化便可重建过去气候变化的思想，从此拉开了冰芯气候环境记录研究的序幕[2]。

冰川是由固态降水（雪）长期积累、演变而成的，在粒雪通过密实化转变为冰川冰的过程中，粒雪层中原先与大气相通的空隙被封闭成为气泡。因此，冰芯中包裹的气泡是古大气的“活化石”。冰芯不但记录着过去气候环境各种要素（如气温、降水、大气化学和环境微生物等）的变化，也记录着影响气候环境变化各种因子（如太阳活动、火山活动和大气温室

*通讯作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A 类）（XDA20060201），国家自然科学基金（41971088）
修改稿收到日期：2020年4月1日

气体含量等）的变化，同时还记录着人类活动对环境的影响。因此，冰芯是研究过去气候环境变化的极佳介质。

冰芯研究从极地冰盖开始，后来扩展到中低纬度山地冰川地区，对全球变化研究作出了重要贡献，极大地推动了冰冻圈科学和全球变化科学的发展；同时，冰芯研究可从历史角度评价人类活动对环境的影响，为相关环境政策的制定提供了重要科学基础。

1 南极和北极冰芯记录的过去气候环境变化

自1966年和1968年冰芯科学家分别在格陵兰冰盖世纪营地（Camp Century）和南极冰盖伯德站（Bryd）首次钻取透底冰芯以来，已在南极冰盖上钻取了沃斯托克（Vostok）、冰穹C（EPICA Dome C）、西南极分冰岭（WAIS Divide）等冰芯，在格陵兰冰盖上钻取了戴伊-3（Dye 3）、格陵兰冰盖冰芯计划（GRIP和GISP 2）、格陵兰北部冰芯计划（NGRIP和NEEM）等冰芯。通过对这些冰芯的研究，已揭示出过去80万年来地球气候与大气中温室气体含量的变化，发现了在末次冰期时气候变化存在明显的突变特征，且南极和北极气候变化之间存在“跷跷板”现象，同时重建了历史时期的太阳活动变化和火山喷发事件信息等。

1.1 轨道时间尺度的气候环境变化

依据南极沃斯托克冰芯中$\delta^{18}O$和δD的记录，重建了4个完整冰期-间冰期旋回的气候变化，并发现该冰芯记录的冰期-间冰期旋回的气温变化幅度达12℃左右[3]。南极冰穹C冰芯将气候环境记录追溯到80万年前。该冰芯记录的近80万年以来的气温、粉尘含量和大气温室气体含量（CO_2、CH_4和N_2O）变化[4-8]，均存在10万年、4万年和2.3万—1.9万年的变化周期，其中10万年周期为主导周期；同时，在轨道时间尺度（冰期-间冰期时间尺度）上大气气溶胶含量、温室气体含量与气候变化之间密切相关[9]。深海氧稳定同位素记录表明，在距今120万—80万年时，更新世气候变化由之前的以4万年周期为主，转变为之后的以10万年周期为主，此即中更新世气候转型。有关假说认为，这一气候转型可能是由大气中CO_2含量降低所造成的[10,11]。对东南极艾伦（Allan）山蓝冰区域冰龄约200万年的冰芯进行了研究，结果表明距今80万年之前的气温变化和大气CO_2浓度变化没有超出距今80万年以来的变化范围，但是距今80万年之前的冰期时气温和大气CO_2浓度较距今80万年以来冰期时的高[12]。这一研究结果不支持中更新世气候转型的CO_2降低假说，但却说明中更新世气候转型之后的冰盛期时冰盖范围较大且大气CO_2浓度较低。

1.2 千年尺度的气候变化

20世纪80年代之前，人们普遍认为末次冰期时气候是相对稳定的。然而，通过对格陵兰戴伊-3冰芯中$\delta^{18}O$高分辨率记录的分析发现，末次冰期时气候存在多次突变事件[13]，即气候在几十年甚至更短的时间内迅速变暖5℃—10℃并进入间冰阶，而在随后的几百年至几千年的时间里气候逐渐变冷并进入冰阶。这一发现引起了古气候学界的巨大震动。Dansgaard等[14]通过对格陵兰冰芯记录的深入研究，发现距今11.5万—1.4万年存在24次气候突变事件，即D-O事件（Dansgaard-Oeschger Events）。基于不同地区高分辨率的石笋、湖泊和海洋等沉积记录，表明D-O事件在北半球大的空间范围内是广泛存在的。相关研究表明，D-O事件的发生与北大西洋深层水形成速率的变化有关[15]。对比南极和北极冰芯气候记录，发现当格陵兰冰芯中D-O事件处于暖位相时，南极冰芯记录的气候状况处于冷期，反之亦然，即末次冰期时南极和北极气候变化在千年时间尺度上存在“跷跷板”现象[16]。最近，利用全球大气CH_4浓度变化的同步性，对南极冰芯和格陵兰冰芯记录的气候变化过程进行精确比较，发现格陵兰地区D-O事件时的突然变暖早于南极气候开始变冷218±92年，格陵兰气

候变冷早于南极气候开始变暖 208±96 年[17]。这表明北极地区的气候突变信息，可通过海洋环流向南半球高纬地区传递。

1.3 太阳活动变化

大气中宇宙成因同位素（如 ^{14}C、^{10}Be、^{36}Cl 等）含量的变化与太阳活动密切相关，分析沉积在冰芯中这些同位素含量的变化就可以揭示过去太阳活动的变化信息。基于格陵兰冰芯中 ^{10}Be 浓度记录，发现大约在公元前 5600 年、5100 年、4200 年、3500 年、2800 年、1900 年、700 年、300 年和公元 800 年、1100 年、1700 年左右的太阳活动相对较弱[18]。最近，依据南极和北极冰芯中的 ^{10}Be 浓度记录，计算了全新世时期太阳总辐射量的变化[19]。这为分析过去气候变化的原因提供了重要资料积累。

1.4 火山喷发事件

一般来说，低纬度火山喷发物质可以通过大气环流波及全球范围，而中高纬度火山喷发物质的影响范围仅限于其所在的半球范围内。但如果中高纬度的火山喷发极为强烈，其喷发物质也可以通过平流层影响到全球范围。格陵兰冰芯记录表明[20]，过去 11 万年来火山喷发主要集中在 3 个时期，即距今 8.5 万—7.9 万年、距今 3.6万—2.7 万年和距今 1.3 万—0.7 万年。其中，最后一个时期的火山活动较强，并与北半球冰盖消退、海平面上升期相一致。这一发现有力地支持了陆地冰量变化及洋盆水量变化会导致火山活动增强的理论。对南北两极冰芯中近 2 000 年来火山事件记录的研究表明[21]，南极冰芯记录了 133 次火山喷发事件，格陵兰冰芯记录了 138 次火山喷发事件；其中，50 次火山喷发事件在两极冰芯中均有记录，这些与热带地区的火山喷发有关。最近，基于南北两极冰芯记录，冰芯研究者建立了火山喷发事件数据库，并据此重建了近 2 000 多年来大气气溶胶光学厚度的变化[22]。这为认识火山喷发所引起的辐射强迫效应，以及评估历史时期火山喷发对气候变化的影响提供了科学基础。

1.5 极地冰芯微生物

冰芯中微生物研究可获得古老微生物及微生物演化的信息。目前，在冰芯中发现的微生物主要包括细菌、病毒、藻类和真菌，其中细菌的数量最多。相关研究表明[23,24]，不论是在南极冰芯中还是在北极冰芯中，冷期时冰芯中微生物数量较多，这与冷期时大气中粉尘含量较高有关。目前，在格陵兰不同年代（距今 14 万—500 年前）的冰芯样品中均发现了多种番茄花叶病毒的 RNA[25]，在南极冰芯样品中也发现了类似病毒颗粒[26]。冰川内部的古老病毒是否会随冰川的消融而释放并造成世界卫生和疾病防控问题，是值得深入研究的重要课题。

2 第三极山地冰芯记录的气候环境变化

在冰芯科学研究之初，大家普遍认为中低纬度山地冰川上较强烈的消融会使其粒雪层中各种气候环境指标的季节性变化信号受到严重影响，不适合于开展冰芯研究。20 世纪 70 年代中后期，美国 Thompson 等[27,28]对秘鲁热带奎尔卡亚（Quelccaya）冰帽开展了考察与冰芯钻取工作，结果发现其粒雪层中 $\delta^{18}O$ 等参数具有显著的季节性变化信号，并以此建立了近 1 500 年的气候变化记录。从此，在全球范围内掀起了山地冰芯研究的热潮。第三极地区是中低纬度山地冰川的主要分布区域，该区域山地冰芯研究备受关注[29]。

我国冰芯研究开始于 20 世纪 80 年代中后期，并已在第三极地区钻取了敦德、古里雅、达索普、东绒布、马兰、普若岗日、崇测、慕士塔格等大量冰芯；同时，开展了第三极地区降水中 $\delta^{18}O$ 气候指示意义的系统研究[30]，据此重建了第三极地区末次间冰期以来的气候环境变化过程。

2.1 末次间冰期以来的气候变化

古里雅冰芯是第三极地区记录时间尺度最长的冰芯。该冰芯中 $\delta^{18}O$ 记录反映了距今 12.5 万年以来的温度变化存在显著的 2 万年和 4 万年周期，并且与北

半球 60°N 太阳辐射变化呈现一致的变化趋势[31]。根据青藏高原地区降水中 $\delta^{18}O$ 与温度的关系，揭示出古里雅冰芯记录的末次间冰期最暖时的气温比现代高约 5°C。古里雅冰芯中 $\delta^{18}O$ 值在距今 5.8万—3.2 万年高于现代，这表明那个时期的气候已达到间冰期的程度。末次冰期时的最低气温出现在距今 2.3 万年，较现代低约 10°C；距今 1.5 万年之后气温逐步回升，新仙女木事件时期气温突然降低，距今约 1.05 万年气温又开始回升，之后进入全新世。距今 7 000—6 000 年是古里雅冰芯记录的全新世最暖期。对青藏高原多个冰芯记录的综合分析表明[32]，过去 1 000 年中最初的 300 年青藏高原地区是由温暖气候主导的，而这一时期正值欧洲的中世纪暖期。同时发现，青藏高原地区小冰期（15—19 世纪）时的气温并不是近 1 000 年来最冷的时期（最冷时期发生在 13 世纪后期），20 世纪的升温是过去 1 000 年中最强的。

2.2 印度季风降水量变化

冰芯净积累量是降水量的代用指标。位于喜马拉雅山中段的达索普冰川，夏季受印度季风的影响，因此其净积累量变化可以反映印度季风的变化。达索普冰芯近 400 年来的净积累量记录表明，该地区降水量在 17 世纪初期开始波动性增加，1650—1670 年降水量明显偏高，随后降水量逐渐降低，在整个 18 世纪降水量偏低[33]。1820—1920 年是降水量最丰富的时期，此后降水量一直持续减少，这反映了近百年来印度季风的减弱趋势。

2.3 大气甲烷浓度变化

利用达索普冰芯首次获得了近 2 000 年来中低纬度大气 CH_4 浓度的变化信息。结果表明，工业革命以前大气中 CH_4 浓度平均为 825 nL/L，比同期南极和格陵兰冰芯记录的大气中 CH_4 浓度分别高出约 160 nL/L 和120 nL/L[34]，从而有力地证实了热带湿地是大气 CH_4 的重要源区。达索普冰芯记录的大气中 CH_4 浓度从 1850 年开始急剧上升，在过去 150 年内增加了 1.4 倍，这反映了人类活动对大气中 CH_4 浓度的影响。

2.4 冰芯微生物与环境

近年来，第三极冰芯微生物研究也取得了长足进展。通过第三极不同区域冰芯中微生物记录的研究[35,36]，揭示出冰芯中微生物数量变化与粉尘含量变化之间存在正相关关系，并且发现降水量较高地区的冰芯中微生物多样性较高，而降水量偏少地区的冰芯中微生物多样性较低。最近，从青藏高原古里雅冰芯中冰龄约 520 年和 1.5 万年的 2 个样品中发现了 33 组病毒种群的遗传信息，并且 28 组是全新的[37]。由于第三极冰川距离人类活动区域较近，应关注这一区域冰川微生物与环境及人类之间关系的研究。

3 冰芯中人类活动信息记录对环境政策制定的推动作用

从农业时代开始，人类从事冶炼、种植等活动时的产物，以及工业化以来在化石燃料消耗、冶金生产、各种化学化工生产、核试验等活动后的产物，通过大气环流传输后，其中一部分会沉降到冰川表面，并在冰芯中记录在案。通过对冰芯中人类活动各种产物含量与其自然环境背景含量的对比分析，可评估人类活动对环境的影响程度，从而使冰芯研究成果服务于相关环境政策的制定。

3.1 冰芯中铅含量记录推动含铅汽油禁用政策的实施

工业污染物往往会对人体健康造成很大的危害。因此，各国政府和国际社会关于污染物对环境及人体健康的影响极为关注，并积极制定相关政策以防止污染。例如，铅（Pb）是一种对人体危害极大的有毒重金属，铅及其化合物进入人体后将对神经、造血、消化、肾脏、心血管和内分泌等多个系统造成危害。20 世纪 60 年代，对格陵兰世纪营地冰芯中铅含量记录的研究，发现自 1750 年人类工业化开始，冰芯中铅含量逐渐增加；而从 20 世纪 30 年代欧美经济复苏

及汽车产业的大发展以来，冰芯中铅含量增加十分迅猛；到20世纪60年代大约增加到7 000年前冰芯中的200倍[38]。正是这个发现促使欧美国家从1970年开始限制含铅汽油的使用。在这一政策的直接影响下，20世纪70—90年代格陵兰冰芯记录中的铅含量迅速降低（图1）[39]。

3.2 冰芯中温室气体含量记录推动温室气体减排政策的制定

现代气候变暖主要是由于大气温室气体含量增加引起的。全球变暖会带来冰川融化与海平面上升、极端天气事件频发、自然灾害加剧、土地荒漠化、水资源安全与生态安全等一系列关系国计民生的重大问题，因此各国政府与国际组织极为关注全球变暖问题。冰芯记录表明，大气中 CO_2 含量在过去几十万年的时间里从未超过300 μL/L，而且在冰期-间冰期时间尺度上其变化振幅为80—120 μL/L；1750年，地球大气中 CO_2 含量约为280 μL/L（图2），维持在间冰期的自然含量水平之内。然而，随着人类工业化进程的加快和化石燃料的大量消耗，使得地球大气 CO_2 含量在20世纪初就超过了300 μL/L；到2006年时观测到的地球大气 CO_2 含量已超过380 μL/L；2016年已上升到400 μL/L以上。目前，地球大气中 CO_2 含量已远远超出了间冰期时大气中 CO_2 自然含量的上限，而且在工业化以来地球大气中 CO_2 含量的上升幅度已经达到甚至超过了地球大气 CO_2 含量在10万年周期上的自然变化幅度。除 CO_2 外，冰芯记录的 N_2O 和 CH_4 含量自1850年以来也迅速上升。人类活动排放引起的大气温室气体含量的快速增加，已引起了全球科学家及各国政府的广泛关注，催生了温室气体减排方案的制定。鉴于目前大气温室气体含量仍处于“高速”上升状态，减少温室气体排放、应对全球变暖刻不容缓。

4 结语

冰芯科学的产生与发展源于学科交叉与分析技术的提高。认识冰芯科学研究与其他学科研究之间的交叉点，是冰芯科学发展的突破口。提出影响人类健康与发展的重大环境问题的冰芯解决方案，是冰芯科学研究服务人类社会的价值所在。建立冰芯中痕量、超痕量物质连续的、高分辨率的分析方法与技术，是提取我们目前还没有认识到的、更多的地球气候环境变化甚至宇宙环境变化信息与过程的关键。发展冰芯精确的测年方法与技术，是我们准确理解气候环境变化过程、机制与原因的重要支撑。这些是冰芯科学发展的必由之路，也是冰芯科学研究为提高气候环境变化预测能力和促进人地关系协调发展服务的科学基础。

冰芯是地球气候环境变化的天然档案库。然而，随着全球气候的进一步变暖，山地冰川会逐渐消亡，极地冰盖的消融也将呈增加趋势。这意味着冰芯这一天然档案库存在“融化消失”的极大风险。为了

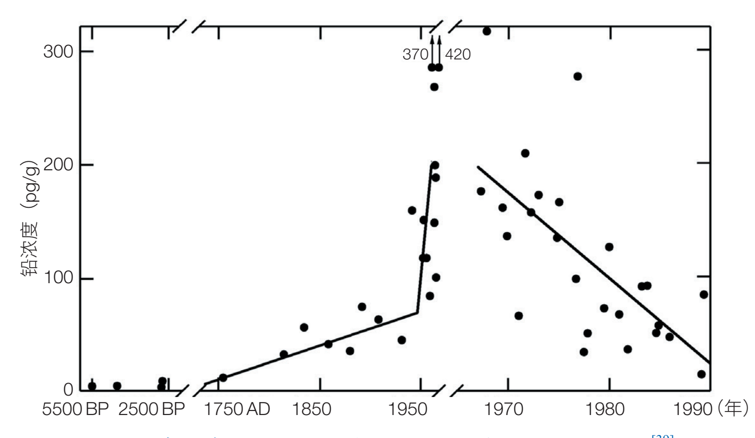


图1 格陵兰冰芯记录的距今5 500年以来的铅浓度变化[39]

BP，距今年代；AD，公元后

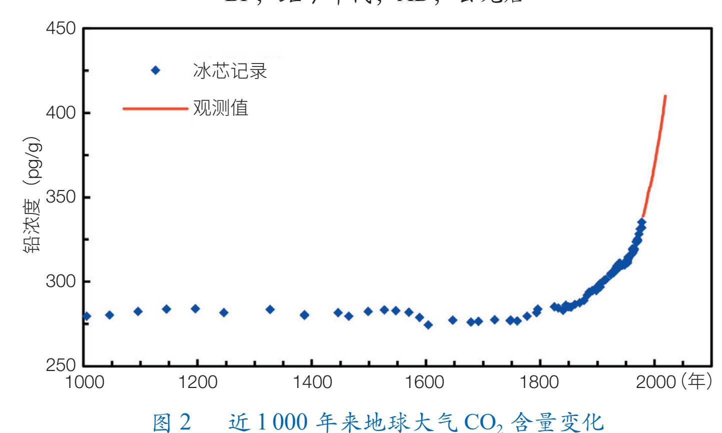


图2 近1 000年来地球大气 CO_2 含量变化

冰芯记录资料来自文献[40]，近期观测资料来自 https://www.co2.earth/annual-co2

更好地认识我们所居住的地球环境的变化，拯救冰芯是当务之急，而这一点西方国家走在了前面。早在 1993 年，美国在科罗拉多州首府丹佛建立了美国国家冰芯实验室（National Ice Core Laboratory）；2018 年，该实验室更名为美国国家科学基金会冰芯机构（National Science Foundation Ice Core Facility）。该机构是对取自全世界不同地区的冰芯进行保存与管理，鼓励不同学科的科学家利用该机构的冰芯样品开展科学研究。2015 年，欧洲科学家发起了“冰存储计划”（Ice Memory），其目的是建立一个国际冰芯储存库，将取自全球关键山地、亚极地和极地冰川的冰芯储存在温度极低的南极地区，为未来的科学家提供高质量的冰芯样品以从事相关科学研究。

以青藏高原为主体的第三极是中低纬度冰川发育最多的地区，加强南北两极研究是我国现在和未来发展的需要。在全球变暖加剧、冰川加速消亡的今天，应尽快拯救冰芯资源，建立我国的冰芯档案储藏库，为国家发展及后世科学研究服务。

参考文献

1 Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.

2 王宁练, 姚檀栋, 秦大河. 冰封的气候年鉴：从水稳定同位素到冰芯古气候. 中国科学：地球科学, 2016, 46(10): 1291-1300.

3 Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature, 1999, 399: 429-436.

4 EPICA community members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. Nature, 2004, 429: 623-628.

5 Jouzel J, Masson-Delmotte V, Cattani O, et al. Orbital and millennial Antarctic climate variability over the past 800,000 years. Science, 2007, 317: 793-796.

6 Lambert F, Delmonte B, Petit J R, et al. Dust-climate couplings over the past 800,000 years from the EPICA Dome C ice core. Nature, 2008, 452: 616-619.

7 Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. Nature, 2008, 453: 379-382.

8 Loulergue L, Schilt A, Spahni R, et al. Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH_4 over the past 800,000 years. Nature, 2008, 453: 383-386.

9 Brook E J, Buizert C. Antarctic and global climate history viewed from ice cores. Nature, 2018, 558: 200-208.

10 Raymo M E, Ruddiman W F, Froelich P N. Influence of late Cenozoic mountain building on ocean geochemical cycles. Geology, 1988, 16(7): 649-653.

11 Berger A, Li X S, Loutre M F. Modelling northern hemisphere ice volume over the last 3 Ma. Quaternary Science Reviews, 1999, 18(1): 1-11.

12 Yan Y, Bender M L, Brook E J, et al. Two-million-year-old snapshots of atmospheric gases from Antarctic ice. Nature, 2019, 574: 663-666.

13 Dansgaard W, Clausen H B, Gundestrup N, et al. A new Greenland deep ice core. Science, 1982, 218: 1273-1277.

14 Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. Nature, 1993, 364: 218-220.

15 Broecker W. The Great Ocean Conveyor: Discovering the Trigger for Abrupt Climate Change. Princeton: Princeton University Press, 2010: 154.

16 EPICA Community Members. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica. Nature, 2006, 444: 195-198.

17 WAIS Divide Project Members. Precise interpolar phasing of abrupt climate change during the last ice age. Nature, 2015, 520: 661-665.

18 Beer J, Siegenthaler U, Bonani G, et al. Information on past

solar activity and geomagnetism from ^{10}Be in the Camp Century ice core. Nature, 1988, 331: 675-679.

19 Steinhilbera F, Abreua J A, Beer J, et al. 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. PNAS, 2012, 109: 5967-5971.

20 Zielinski G A, Mayewski P A, Meeker L D, et al. A 110000-yr record of explosive volcanism from the GISP2 (Greenland) ice core. Quaternary Research, 1996, 45: 109-118.

21 Sigl M, McConnell J R, Layman L, et al. A new bipolar ice core record of volcanism from WAIS Divide and NEEM and implications for climate forcing of the last 2000 years. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118: 1151-1169.

22 Toohey M, Sigl M. Volcanic stratospheric sulfur injections and aerosol optical depth from 500 BCE to 1900 CE. Earth System Science Data, 2017, 9(2): 809-831.

23 Miteva V, Teacher C, Sowers T, et al. Comparison of the microbial diversity at different depths of the GISP2 Greenland ice core in relationship to deposition climates. Environmental Microbiology, 2009, 11: 640-656.

24 Knowlton C, Veerapaneni R, D'Elia T, et al. Microbial analyses of ancient ice core sections from Greenland and Antarctica. Biology (Basel), 2013, 2: 206-232.

25 Castello J D, Rogers S O, Starmer W T, et al. Detection of tomato mosaic tobamovirus RNA in ancient glacial ice. Polar Biology, 1999, 22(3): 207-212.

26 Priscu J C, Christner B C, Foreman C M, et al. Biological material in ice cores// Elias S A, ed. Encyclopedia of Quaternary Science, Volume 2. Oxford: Elsevier, 2007: 1156-1166.

27 Thompson L G, Dansgaard W. Oxygen isotope and microparticle studies of snow samples from Quelccaya Ice Cap, Peru. Antarctic Journal of the US, 1975, 10(1): 24-26.

28 Thompson L G, Mosley-Thompson E, Bolzan J F, et al. A 1500 year record of tropical precipitation recorded in ice cores from Quelccaya ice cap, Peru. Science, 1985, 229(4717): 971-973.

29 Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Ice core records of climate variability on the Third Pole with emphasis on the Guliya ice cap, western Kunlun Mountains. Quaternary Science Reviews, 2018, 188: 1-14.

30 Yao T, Masson-Delmotte V, Gao J, et al. A review of climatic controls on δ^{18}O in precipitation over the Tibetan Plateau: Observations and simulations. Reviews of Geophysics, 2013, 51(4): 525-548.

31 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究. 中国科学（D辑）, 1997, 27(5): 447-452.

32 姚檀栋, 秦大河, 徐柏青, 等. 冰芯记录的过去1000 a青藏高原温度变化. 气候变化研究进展, 2006, 2(3): 99-103.

33 姚檀栋, 段克勤, 田立德, 等. 达索普冰芯积累量记录和过去400 a来印度夏季风降水变化. 中国科学（D辑）, 2000, 30(6): 619-627.

34 徐柏青, 姚檀栋. 达索普冰芯记录的过去2 ka来大气中甲烷浓度的变化. 中国科学（D辑）, 2001, 31(1): 54-58.

35 Yao T, Liu Y, Kang S, et al. Bacteria variabilities in a Tibetan ice core and their relations with climate change. Global Biogeochemical Cycles, 2008, 22: GB4017.

36 Liu Y, Priscu J C, Yao T, et al. Bacterial responses to environmental change on the Tibetan Plateau over the past half century. Environmental Microbiology, 2016, 18(6): 1930-1941.

37 Zhong Z, Solonenko N E, Li Y, et al. Glacier ice archives fifteen-thousand-year-old viruses. bioRxiv, 2020, doi: 10.1101/2020.01.03.894675.

38 Murozumi M, Chow T J, Patterson C. Chemical concentrations of pollutant lead aerosols, terrestrial dusts and sea salts in Greenland and Antarctic snow strata. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1969, 33(10): 1247-1294.

39 Boutron C F, Gorlach U, Candelone J P, et al. Decrease in

anthropogenic lead, cadmium and zinc in Greenland snows since the late 1960s. Nature, 1991, 353: 153-156.

40 Etheridge D M, Steele L P, Langenfelds R L, et al. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO_2 over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(D2): 4115-4128.

Study on Climatic and Environmental Changes Recorded in Ice Cores: From Science to Policy

YAO Tandong[1,2*] QIN Dahe[3] WANG Ninglian[2,4,5] LIU Yongqin[1,2] XU Baiqing[1,2]

（1 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

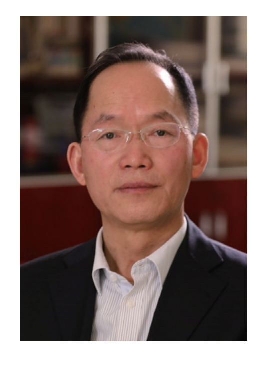
3 State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

4 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;

5 Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China）

Abstract Ice core is an important carrier of the past climatic and environmental change information. In this paper, we firstly introduced how ice cores record past climatic and environmental changes. Then, we elaborated the achievements of ice core research in the past climate change, levels of atmospheric greenhouse gases, solar activity, volcanic eruptions, and human activities. Thirdly, the role of ice core research in promoting relevant environmental policy making was stated, such as the ban on Pb additives in gasoline and greenhouse gas emission reduction policies. And finally, it was suggested that the state should establish a National Ice Core Facility to drill and store the ice cores from the Three Poles (Antarctic, Arctic, and the Third Pole) to serve the future scientific research and national development.

Keywords ice core record, the Three Poles' environment, climate change, environmental policy, human activities, global warming



姚檀栋 中国科学院院士，第二次青藏高原综合科学考察研究队队长、中国科学院战略性先导科技专项（A类）“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”首席科学家。中国青藏高原研究会理事长、“第三极环境（TPE）”国际计划主席。长期从事青藏高原科学考察研究，在冰川与环境变化研究领域作出了系统性创新贡献。研究发现气候变暖和西风与季风协同作用是青藏高原冰川变化区域差异的主要驱动力；组织撰写的《西藏高原环境变化科学评估》报告为推进青藏高原生态屏障建设提供了重要科学依据；发起的TPE国际计划促进了国际青藏高原研究领域的深度交流。发表论文300多篇，其中重要成果发表在包括*Nature*、*Science*、*Nature Climate Change*、*Review of Geophysics*、*BAMS*等国际权威期刊上。2017年因在青藏高原冰川和环境研究方面所作出的贡献荣获维加奖。E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn

* Corresponding author

YAO Tandong Member of Chinese Academy of Sciences (CAS). He is also the Chair of the Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research program (STEP) and Pan-Third Pole Environment study for a Green Silk Road program (Pan-TPE), Chairman of the China Society on Tibetan Plateau (CSTP), Co-chair of Third Pole Environment (TPE) Program. Yao Tandong has been focusing and internationally acknowledged of his study on glacier and environment on the Tibetan Plateau. He has carried out different programs relating to environment in the past 30 years. His research has been published in *Nature*, *Science*, *Nature Climate Change*, *Review of Geophysics*, *BAMS*, etc. One of his recent works reveals that, under the impact of global warming, glaciers in the Tibetan Plateau and surrounding regions are retreating rapidly and spatially different because of the interaction between the Indian monsoon and westerlies, with the most rapid retreating in the southeast Tibetan Plateau and the least retreating in the northwest Tibetan Plateau. He has successfully organized many international conferences and workshops, as well as several major national and international research programs. Among them, the TPE program has been internationally influential. He has been awarded the Vega Medal for his pioneering work on the Tibetan Plateau glacier and environment in 2017. E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn

■责任编辑：岳凌生